

CENTRO UNIVERSITÁRIO DE FORMIGA – UNIFOR-MG
CURSO DE ENGENHARIA QUÍMICA
JÚLIA GIORDANI SARDIÑA CAMPOS

ECOCOMPÓSITO DE POLÍMERO-MADEIRA:
UM SUBSTITUTO ECOLÓGICO DA MADEIRA NATURAL

FORMIGA – MG
2018

JÚLIA GIORDANI SARDIÑA CAMPOS

ECOCOMPÓSITO DE POLÍMERO-MADEIRA:
UM SUBSTITUTO ECOLÓGICO DA MADEIRA NATURAL

Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química do UNIFOR-MG, como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Química.
Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva.

FORMIGA – MG

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca UNIFOR-MG

C198 Campos, Júlia Giordani Sardiña.
Ecocompósito de polímero-madeira: um substituto ecológico da
madeira natural / Júlia Giordani Sardiña Campos. – 2018.
48 f.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia
Química) - Centro Universitário de Formiga – UNIFOR, Formiga, 2018.

1. Resíduos plásticos. 2. Resíduos madeireiros. 3. Ecocompósito.
I. Título.

CDD 577.14

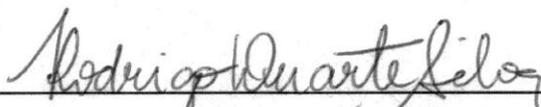
Catálogo elaborado na fonte pela bibliotecária
Rosana Guimarães Silva – CRB6-3064

Júlia Giordani Sardiña Campos

ECOCOMPÓSITO DE POLÍMERO-MADEIRA:
UM SUBSTITUTO ECOLÓGICO DA MADEIRA NATURAL

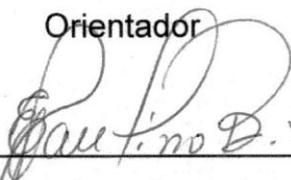
Trabalho de conclusão de curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Química do UNIFOR-MG, como requisito
parcial para obtenção do título de bacharel
em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rodrigo Duarte Silva.

Orientador



Prof. Me. Emerson Paulino dos Reis

UNIFOR-MG



Prof. Neylor Makalister Ribeiro Vieira

UNIFOR-MG

Formiga, 8 de novembro de 2018.

RESUMO

Dentre a grande quantidade de resíduos sólidos presentes no meio-ambiente, destacam-se os plásticos e as sobras de madeira proveniente da indústria moveleira. Alguns plásticos levam mais de cem anos para se decompor, e os resíduos moveleiros além de ocuparem grande espaço nos aterros sanitários são altamente explosivos. A escassez de recursos, o aumento da demanda e o apelo ambiental, fortalecem a tendência do desenvolvimento sustentável. A necessidade de reutilização e reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos originou-se a criação do ecocompósito polímero-madeira a partir da matéria-prima oriunda do lixo termoplástico pós-consumo e de resíduos madeireiros, pinus e eucalipto. Os reforços lignocelulósicos substituem a utilização de cargas inorgânicas e minerais de alto custo, e são adicionados à matriz termoplástica com intuito de aumentar a reciclagem de plásticos, agregar valor aos resíduos madeireiros e, conseqüentemente, reduzir o corte de árvores. A madeira ecológica pode parodiar ou até mesmo substituir a madeira natural em suas aplicações, e seu custo é bem menor ao longo do tempo, devido à ausência de manutenções. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta uma revisão bibliográfica sobre os ecocompósitos polímero-madeira, abordando suas aplicações, as vantagens ambientais relacionadas à sua utilização e as propriedades físicas e mecânicas decorrentes das formulações do compósito.

Palavras-chave: Resíduos plásticos. Resíduos madeireiros. Ecocompósito.

ABSTRACT

Among the large amount of solid residues present in the environment, we highlight those composed of plastics and the wood waste from the furniture industry. Some plastics take more than a hundred years to decompose, and the residue from the furniture industry besides taking up large space in landfills is highly explosive. Scarcity of resources, increased demand and environmental appeal strengthen the trend of sustainable development. The need to reuse solid urban waste originated the creation of the polymer-wood ecocomposite using as raw material the post-consumption thermoplastic waste and wood residue, such as those composed of pine and eucalypt wood. Lignocellulosic reinforcements replace the use of high-cost inorganic and mineral fillers and are added to the thermoplastic matrix in order to increase the recycling of plastics, add value to wood residues and, consequently, reduce tree cutting. Ecological wood can parody or even replace natural wood in its applications, and its cost is much lower over time due to the lack of maintenance. In this context, the present work presents a literature review on the polymer-wood ecocomposites, addressing their applications, the environmental advantages related to their use and the physical and mechanical properties resulting from the composite formulations.

Keywords: Plastic waste. Wood waste. Ecocomposite.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática dos componentes de um compósito.	12
Figura 2 – Componentes de um compósito polimérico	13
Figura 3 – Simbologia para identificação de embalagens poliméricas	21
Figura 4 – Estrutura dos polímeros termoplásticos (a) PET (b) PEAD (c) PEBD (d) PS (e) PVC (f) PP	23
Figura 5 – Parede celular vegetal da madeira	25
Figura 6 – Estrutura da celulose.....	26
Figura 7 – Gráfico da composição dos resíduos sólidos na coleta seletiva	30
Figura 8 – Gráfico dos tipos de plásticos encontrados no volume total de resíduos disposto nos aterros sanitários no Brasil em 2016	30
Figura 9 – Fluxograma do processo de extrusão	33
Figura 10 – Desenho de uma extrusora com suas zonas funcionais	34
Figura 11 – Gráfico comparativo entre custo/benefício dos tipos de madeiras	37

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	Acrilonitrila-butadieno-estireno
AC	Agente compatibilizante
AM	Anidrido Maleico
Cl	Cloro
-Cl-	Grupo Funcional dos Derivados Diclorotriazino
-CN	Cianeto
-(CO ₂)O-	Grupo Funcional do Anidrido Maleico
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CPM	Compósito Plástico-Madeira ou Compósito Polímero-Madeira
DNA	Ácido Desoxirribonucleico
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente
IMA	Instituto de Macromoléculas
kg	Quilograma
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> – Placa de Fibra de Média Densidade
<i>MM</i>	Massa Molar
<i>MM_n</i>	Massa Molar Numérica Média
<i>MM_w</i>	Massa Molar Ponderal Média
PE	Polietileno
PEAD	Polietileno de Alta Densidade
PEBD	Polietileno de Baixa Densidade
PET	Politereftalato de Etileno
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
PVC	Policloreto de Vinila
RNA	Ácido Ribonucleico
<i>T_f</i>	Temperatura de Fusão
<i>T_g</i>	Temperatura de Transição Vítrea
UNESP	Universidade Estadual Paulista
WPC	<i>Wood Plastic Composites</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	8
2	OBJETIVOS	10
2.1	Objetivo geral.....	10
2.2	Objetivos específicos.....	10
3	METODOLOGIA.....	11
4	REFERENCIAL TEÓRICO	12
4.1	Compósitos.....	12
4.2	Compósito polímero-madeira	13
4.3	História da madeira ecológica.....	16
4.4	Polímeros	18
4.4.1	Classificação dos polímeros	19
4.4.1.1	Polímeros termoplásticos.....	20
4.4.2	Aditivos	23
4.5	Madeira	24
4.6	Agentes compatibilizantes	26
4.7	Reciclagem.....	28
4.7.1	Resíduos plásticos.....	29
4.7.2	Resíduos madeireiros	31
4.8	Processo produtivo do CPM.....	32
4.9	Aplicações da madeira ecológica	34
4.10	Vantagens, limitação e desvantagem da madeira ecológica.....	35
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
6	CONCLUSÃO.....	41
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de reutilização dos materiais descartados tornou-se inevitável. A escassez de recursos, o aumento da demanda e o apelo ambiental, fortalecem a tendência do desenvolvimento sustentável. Os materiais plásticos estão presentes em diversos produtos e quando são descartados, constituem um problema. Alguns levam mais de cem anos para se decompor, contribuindo para o surgimento de enchentes, poluindo rios e nascentes. Basicamente, os resíduos plásticos resumem-se em embalagens descartáveis, sacolas, copos, potes, garrafas, utensílios de limpeza, produtos de higiene pessoal e brinquedos (BREMER; COLLI, 2013; GUIMARÃES, 2013).

Ainda que a destinação final dos resíduos plásticos represente uma preocupação para a sociedade atual, as indústrias moveleiras também vêm afetando o equilíbrio ambiental devido ao grande volume de resíduos gerados. Dentre os resíduos, a serragem e o pó-de-lixo destacam-se pela baixa densidade exigindo grandes espaços para estocagem, além do pó-de-lixo ser um material altamente explosivo. Mesmo que na maioria das empresas madeireiras a serragem seja considerada um resíduo, existem empresas em que a serragem é um produto, e a diferença está no fato da serragem como produto precisar atender a especificações técnicas de granulometria, teor de umidade, espécie de madeira, cor, além da garantia de fornecimento contínuo (YAMAJI, 2004).

A inevitabilidade de reutilização e reaproveitamento dos resíduos sólidos urbanos levou à criação do compósito plástico-madeira ou compósito polímero-madeira (CPM), também denominado madeira ecológica, madeira biosintética, madeira sustentável, madeira inteligente ou *wood plastic composites* (WPC). O CPM é composto de matéria-prima oriunda do lixo plástico reciclado e de resíduos madeireiros, além de aditivos, concedendo ao produto final características mecânicas e físico-químicas de cada material isoladamente, além de propriedades iguais ou superiores às da madeira natural. Os reforços lignocelulósicos são adicionados aos plásticos com intuito de melhorar as propriedades térmicas e mecânicas, além de reduzir os custos e a geração de resíduos poluentes, aumentar a reciclagem de plásticos, agregar valor aos resíduos madeireiros e, conseqüentemente, reduzir o corte de árvores (ALMEIDA, 2013; AMARAL; SANTANA, 2009; HILLIG, 2006; MOLINA; CARREIRA; CALIL, 2009).

Foi na Europa, em 1970, que surgiu a ideia de ecocompósitos de polímero-madeira, utilizando o que se considerava lixo. Esse produto desembarcou em solo brasileiro por volta de 1990. No Brasil, o Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano (IMA) foi o pioneiro nas pesquisas sobre o tema. Os CPM são materiais leves e de fácil moldagem, o que permite que sejam utilizados para confecção de peças com formas complexas e sem emendas, abrangendo uma vasta variedade de utilizações (CLEMONS, 2002; NAZÁRIO ET AL, 2016).

A produção de materiais com reutilização de resíduos é uma nova tendência mercadológica que visa a obtenção de produtos ecologicamente corretos, com diminuição do desperdício e valorização da matéria-prima. Por exemplo, na produção de 700 kg da madeira biosintética podem ser utilizadas cerca de 233 mil sacolas plásticas e o corte de uma árvore adulta pode ser impedido (BREMER; COLLI, 2013; ZOCH, 2013).

Portanto, dada a importância ambiental do CPM faz-se necessária a investigação do potencial de substituição da madeira convencional pelo material compósito, uma vez que o CPM precisa atender às especificações necessárias para que possa, de fato, substituir a madeira convencional.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão bibliográfica sobre compósitos plástico-madeira, analisando seu potencial e as vantagens da substituição da madeira natural.

2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- Abordar conceitos gerais referentes ao tema, como compósitos, polímeros, aditivos, madeira e agentes compatibilizantes;
- Relatar a história e evolução da utilização do CPM;
- Discutir sobre a reciclagem de materiais plásticos e resíduos madeireiros;
- Apresentar o processo produtivo do CPM;
- Mostrar as principais aplicações do ecocompósito.
- Expor as vantagens, limitações e desvantagens do ecocompósito em comparação a madeira natural.
- Revisar bibliografias que explanem as propriedades físicas e mecânicas dos CPM, decorrente da porcentagem de resíduos lignocelulósicos e em comparação às propriedades individuais de cada constituinte.

3 METODOLOGIA

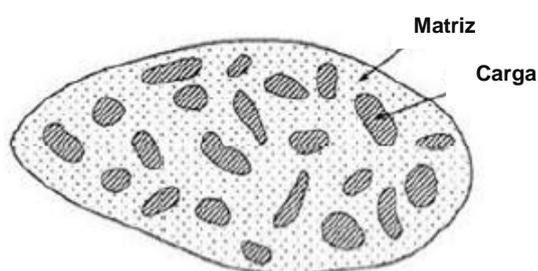
O presente estudo caracteriza-se como uma revisão bibliográfica de caráter exploratório, descritivo e qualitativo, no qual adotou-se um levantamento bibliográfico fundamentado em livros, artigos científicos, revistas científicas, dissertações, teses e monografias, disponibilizadas pelo Google Acadêmico, abordando as propriedades e aplicações do CPM, especialmente no Brasil.

4 REFERENCIAL TEÓRICO

4.1 Compósitos

Um compósito é um material multifásico artificial, constituído de dois ou mais materiais de naturezas diferentes interligados de modo a formar um novo material. O material compósito exhibe as propriedades de ambos os constituintes, resultando em uma melhor combinação de propriedades. Muitos compósitos são constituídos por apenas duas fases: a matriz e a fase dispersa (cargas). A matriz é contínua e envolve a fase dispersa, conferindo estrutura ao material compósito e completando os vazios entre a carga, ao mesmo tempo em que conserva sua posição referente (FIG. 1). A carga geralmente é responsável por melhorar as propriedades mecânicas, eletromagnéticas e/ou químicas do compósito. Normalmente os componentes não se misturam, sendo necessária a utilização de um compatibilizante (ASKELAND; WRIGHT, 2016; CALLISTER, 2008; MANO, 1991; SMITH; HASHEMI, 2012).

Figura 1 – Representação esquemática dos componentes de um compósito.



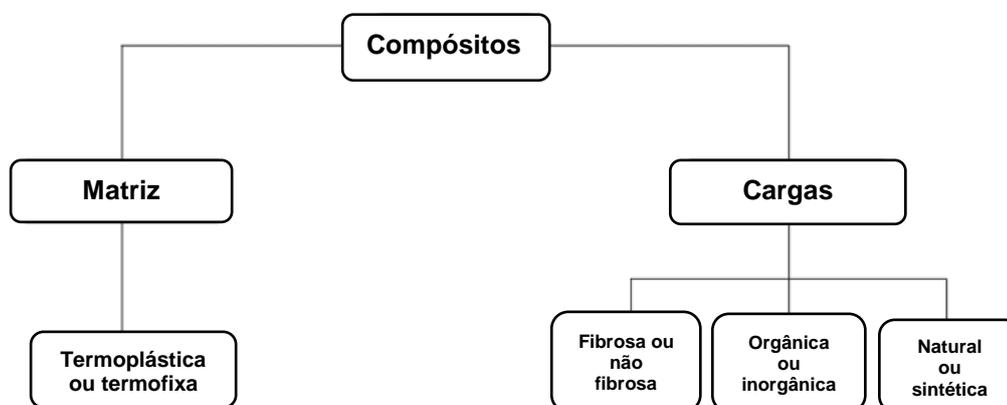
Fonte: Adaptada de ALMEIDA; 2013, p. 30.

A palavra “compósito” é um conceito moderno. Contudo, usar a alta resistência de cargas para endurecer e consolidar uma matriz de material barato é bem arcaico, e quase todos os materiais naturais que devem suportar cargas, como a madeira, são compósitos. Entretanto, a indústria de compósitos é nova. As tecnologias atuais exigem materiais com combinações incomuns de propriedades, as quais não são atendidas pelas ligas metálicas, cerâmicas e materiais poliméricos convencionais (ASHBY; JONES, 2007; CALLISTER, 2008).

Os compósitos fundaram uma classe de materiais heterogêneos, podendo ser ou não poliméricos (MANO, 1991). A adição de cargas à matriz polimérica produz os

chamados compósitos poliméricos (FIG. 2) (ALMEIDA; SOUZA, 2015; CALLISTER, 2008).

Figura 2 – Componentes de um compósito polimérico



Fonte: Adaptada de ALMEIDA; SOUZA; 2015, p. 103.

Os compósitos têm ganhado cada vez mais destaque, visto que apresentam propriedades físicas e mecânicas não alcançadas por outros materiais, além de serem mais viáveis economicamente. Dentre esses materiais, uma nova classe vem se sobressaindo por ser ecologicamente correta, os ecocompósitos (NAZÁRIO et al., 2016).

Os ecocompósitos são de fácil moldagem e permitem formas complexas sem emendas. Podem ser moldados na cor final do produto, permitindo um ótimo acabamento. São leves e pretendem substituir os metais, como aço e alumínio, e as madeiras em aplicações de uso geral. Dentre os ecocompósitos, os CPM constituídos de fibras naturais e resíduos poliméricos, possuem um alto potencial como novos materiais (TEIXEIRA, 2005).

4.2 Compósito polímero-madeira

A tendência mundial é procurar o melhor aproveitamento de resíduos urbanos, buscando-se novas matérias-primas e tecnologias de produção para geração de novos produtos. Dentre os resíduos urbanos, os plásticos destacam-se devido ao aumento do seu consumo. Depois de utilizados, os plásticos são descartados como resíduo pós-consumo, e por não serem biodegradáveis tornam-se um sério problema ambiental. A indústria madeireira, por sua vez, gera uma significativa quantidade de

resíduos em seu processamento primário e também nas operações de corte e acabamento de móveis. Um dos possíveis usos para os resíduos de plástico e madeira é a fabricação do CPM, constituído de uma matriz contínua de resina termoplástica reforçada com resíduos madeireiros, o qual apresenta as melhores qualidades de cada constituinte (HILLIG, 2006; MILAGRES, 2004).

Desde a pré-história a madeira é utilizada de inúmeras formas para diversos fins. O crescimento da civilização humana provocou o aumento do consumo de matérias-primas florestais conduzindo à progressiva devastação das florestas, levando assim à necessidade de encontrar meios menos prejudiciais para o aproveitamento da madeira. A produção da madeira ecológica permite o melhor aproveitamento da madeira e dos resíduos gerados durante seu processamento (MILAGRES, 2004).

O CPM corresponde a um produto atual e ecológico, recente no Brasil, mas muito utilizado em outros países, principalmente nos Estados Unidos. É produzido a partir de resíduos de madeira, usados como reforço ou carga, e resíduos de plástico pós-consumo, usados como matriz polimérica. A mistura dos componentes é obtida a partir da tecnologia industrial, resultando em peças que podem parodiar e, em alguns casos, substituir a madeira natural, com inúmeras vantagens, reduzindo o corte de árvores e permitindo o uso de resíduos, contribuindo assim com o meio ambiente (ALMEIDA, 2013; AMARAL; SANTANA, 2009; MOLINA; CARREIRA; CALIL, 2009).

As matrizes poliméricas classificam-se em termoplásticas ou termofixas, destacando-se a termoplástica devido à sua baixa temperatura de processamento. Utilizam-se termoplásticos com temperatura de processamento inferior a 220°C, devido a degradação da madeira em temperaturas superiores. A exposição do resíduo madeireiro a temperaturas acima do aceitável libera compostos voláteis, causa descoloração, aparecimento de odor e fragilização do compósito. Outra justificativa para o uso de termoplásticos é o fato de amolecem sob aquecimento e enrijecerem quando resfriados, permitindo vários ciclos de processamento, facilitando processos de recuperação e reciclagem (MANO, 1991; TEIXEIRA, 2005; YAMAJI; BONDUELLE, 2004). A maioria dos CPM são fabricados com polietileno (PE), polipropileno (PP), policloreto de vinila (PVC), poliestireno (PS) e acrilonitrila butadieno estireno (ABS), sendo o material plástico selecionado com base nas propriedades, necessidades de produção, disponibilidade e custo (CATTO, 2015; CLEMONS, 2002).

O resíduo plástico destinado à produção do CPM passa por uma reciclagem mecânica, enfrentando uma série de etapas, como seleção, moagem, lavagem, aglutinação e reprocessamento; originando grânulos de plástico reciclado. A reciclagem de plásticos provenientes dos resíduos urbanos pode ser mais complexa devido às contaminações presentes, envolvendo-se a separação, pré-lavagem, lavagem, enxágue, moagem, secagem e cuidados com o efluente; depois de separado o plástico de interesse, inicia-se o reprocessamento: aglutinação e extrusão (AMARAL; SANTANA, 2009).

O surgimento do CPM deu-se pela união das tecnologias japonesa e belga, utilizando misturas de polietileno de baixa densidade (PEBD), polietileno de alta densidade (PEAD), ABS, PP e PVC. A aplicação de tal compósito vem substituindo a madeira convencional em várias aplicações e em alguns casos em aplicações onde não era possível a utilização da madeira natural como, por exemplo, na fabricação de tampas de bueiros (GUAMÁ et al., 2008; SPINACÉ; PAOLI, 2005).

No Brasil, a madeira para a produção do CPM vem de resíduos de coníferas, pinus e eucalipto, ou combinações de ambos em proporções variáveis, moídos e selecionados através de peneiramento e parcialmente secos em processos simples (MACIEL et al., 2004; RODOLFO; JOHN, 2006). As principais madeiras escolhidas para cultivo em florestas plantadas e certificadas são as espécies de pinus e eucalipto, devido ao seu rápido crescimento, facilidade de manuseio e bom retorno comercial, mesmo não sendo espécies nativas do Brasil (CATTO, 2015). A madeira utilizada é proveniente de resíduos, o que diminui o preço e aumenta a disponibilidade da matéria-prima (TEIXEIRA; CÉSAR, 2006). As resinas termoplásticas são obtidas diretamente das indústrias de beneficiamento de plásticos, nos diversos depósitos coletores ou por fornecedores comerciais de plástico, sendo, então, reprocessadas (MACIEL, 2001; ZOCH, 2013).

A associação de materiais lignocelulósicos como agentes de reforço em compósitos poliméricos substituem a utilização de cargas inorgânicas e minerais de alto custo, como o talco, o carbonato de cálcio, mica e fibras de carbono ou de vidro desempenhando as mesmas funções e com vantagens ecológicas na redução de resíduos sólidos, baixo custo de matéria-prima, variedade de aplicações, preço acessível dos produtos gerados e boas propriedades mecânicas do compósito (COSTA, 2007; MANRICH, 2005). A indústria americana de plásticos foi a primeira a utilizar madeira como reforço para os polímeros devido à baixa densidade, baixa

estabilidade térmica e a tendência à absorção de umidade desses materiais (CORRÊA, 2004).

A madeira sob forma de serragem ou pó de lixa, reforça resinas termoplásticas, de baixo preço e pós-consumo. O compósito é atóxico, possui boa durabilidade e permite outros ciclos de produção e uso com possibilidade de ser reciclável. Geralmente são produzidos pelos processos de extrusão, injeção e compressão (MACIEL et al., 2004). A produção da madeira ecológica é um processo flexível, realizado de formas distintas decorrente dos diferentes tipos de plásticos que podem ser utilizados, variando de acordo com a preferência do fabricante. É possível a fabricação do compósito em qualquer cor, desde que o resíduo plástico seja claro, introduzindo-se corantes na mistura; resíduos plásticos coloridos originam materiais baseados na coloração dos mesmo (ALMEIDA, 2013; CABRAL et al., 2016).

A madeira sustentável apresenta as vantagens do plástico em si. Não apresenta rachaduras, não sofre ação de mofos, pragas, cupins e roedores, é altamente resistente à umidade e ao apodrecimento. Pode ser utilizada em todos os tipos de ambientes, até mesmo naqueles desfavoráveis ao uso da madeira tradicional. Pode ainda ser colada, serrada e parafusada. Além disso, ela não solta farpas e não precisa ser envernizada. É aconselhada para estruturas que requerem praticidade, resistência e pouca manutenção. As propriedades físicas e mecânicas do CPM resultarão da quantidade de resíduo de madeira utilizada em sua formulação (ALMEIDA, 2013; MOLINA; CARREIRA; CALIL, 2009).

4.3 História da madeira ecológica

Por volta de 1900 foi criado na Europa o primeiro tipo de compósito envolvendo a madeira e um plástico termofixo. O produto foi denominado Bakelite, e era produzido à base de pó de madeira com resina fenólica (CLEMONS, 2002, YAMAJI; BONDUELLE, 2004).

Em 1941 e 1942, iniciou-se na Alemanha e nos Estados Unidos a produção comercial de painéis de madeira aglomerada, buscando o aproveitamento de resíduos de madeiras excedentes de serrarias. Durante a Segunda Guerra Mundial a produção foi paralisada e retomou o seu crescimento logo após a término da Segunda Guerra, e na década de 1960 expandiu-se maciçamente pelo resto do mundo (MACIEL, 2001).

A madeira ecológica teve seu primeiro desenvolvimento registrado na década de 1970, quando seu processo de fabricação desenvolveu-se na Europa e no Japão. Como matéria-prima utilizavam-se sucatas plásticas pós-industriais, único resíduo plástico disponível e barato naquela época. Ainda em 1970, o holandês Eduard Klobbie desenvolveu um sistema de transformação de resíduos de resina sintética termoplástica em um produto com características que parodiavam a madeira (LAMPO; NOSKER; SULLIVAN, 2003).

Ainda na década de 1970, a indústria automobilística utiliza compósitos de PP com farinha de madeira conhecidos no mercado, como *woodstock* (CORREA et al., 2003).

Ao longo da década de 1980, indústrias e pesquisadores investigaram o uso do pó de madeira como carga ou reforço em materiais termoplásticos, aumentando a rigidez e reduzindo os custos com matéria-prima (AMARAL; SANTANA, 2009).

No final da década de 1980, principalmente nos Estados Unidos, a produção de madeira ecológica começou a ser considerada uma das possíveis alternativas aos resíduos plásticos nos aterros sanitários. Inicialmente, o compósito era utilizado como matéria-prima para fabricação de mesas de piquenique e bancos de jardim. Durante a década de 1990, desenvolveram-se tecnologias com a finalidade de produzir um compósito de polímero termoplástico e madeira que substituísse a madeira natural em cercas e deques. No entanto, a falta de padrões e de especificações foi vista como uma barreira para a aplicação da madeira ecológica, principalmente na construção civil (KRISHNASWAMY; LAMPO, 2001).

Em 1990, um trabalho com significativa contribuição para tornar a madeira ecológica uma realidade no Brasil foi o estudo do professor Dr. Nascimento no Diretório de Projetos Tecnológicos da UNESP, com a colaboração de colegas da Universidade de Ciências Aplicadas de Darmstadt, Alemanha, que desenvolveram um projeto de pesquisa para um processo de fabricação de baixo custo, utilizando tecnologias menos sofisticadas, para a produção de madeira ecológica adequado às condições brasileiras (OLIVEIRA, 2007).

Em 1991, nos Estados Unidos, ocorreu a primeira conferência de CPM. Logo em seguida, as conferências também foram realizadas no Canadá e em vários países da Europa. Os CPM tiveram produção inicial na Europa e estão sendo fabricados nos Estados Unidos há décadas. Entretanto, o maior crescimento ocorreu a partir da década de 1992 (CLEMONS, 2002).

Em 2002 instalou-se no Sul do Brasil a primeira fábrica de madeira ecológica, tendo como matéria-prima a utilização de sobras de fibras de MDF (*Medium Density Fiberboard*). O MDF é fabricado através da aglutinação de fibras de madeira (pinus e eucalipto) com resinas sintéticas (ureia-formaldeído) e outros aditivos. O Laboratório de Produtos Florestais (IBAMA) realizou testes no composto plástico-madeira, com resultados promissores, principalmente para usos externos (TEIXEIRA; MOREIRA; COSTA, 2002).

4.4 Polímeros

De acordo com Canevarolo (2002), a palavra ‘polímero’ é resultado da junção das palavras gregas “poli” (muitos) e “meros” (unidade de repetição). (ANDRADE, 2007). A estrutura desses materiais é formada por cadeias longas e retorcidas. Apresentam como características predominantes a resistência à corrosão, baixa massa específica e isolamento térmico e elétrico (TOLENTINO, 2015).

Conforme Andrade (2007), os materiais poliméricos são provenientes de hidrocarbonetos, compostos basicamente de hidrogênio e carbono, derivados do petróleo, um combustível fóssil não-renovável. Entretanto, em harmonia com Askeland e Wright (2016), também podem ser inorgânicos, como os silicones baseados na estrutura de Si-O.

As propriedades dos polímeros variam gradativamente com a massa molar (MM), a qual depende das condições de polimerização para cada monômero. Polímeros naturais têm MM mais elevada que os polímeros sintéticos (MANO; MENDES, 2004). A MM de um polímero agregada a estrutura química do mesmo é o parâmetro que comanda as propriedades e o uso desses materiais. A MM é uma das características do polímero que gera vários tipos diferentes de materiais, porém com a mesma composição química (MANRICH, 2005). Conforme Callister (2008), MM extremamente altas são verificadas em polímeros com cadeias muito longas. Durante a polimerização nem todas as cadeias poliméricas crescem até o mesmo comprimento, resultando em uma distribuição das MM . Normalmente, especifica-se uma MM numérica média (MM_n) e uma MM ponderal média (MM_w). Consoante Askeland e Wright (2016), a MM_n é obtida dividindo-se a massa de determinada amostra de polímero pelo número total de moléculas presente na amostra. A MM_w é

obtida levando-se em conta as frações mássicas correspondentes às cadeias em faixas de tamanho i .

Em relação ao processamento de polímeros, a cristalização, a fusão e a transição vítrea são os três fenômenos de maior importância. Na cristalização, durante o resfriamento, uma fase sólida cristalina é produzida a partir de um líquido fundido com estrutura molecular aleatória, sendo que o grau de cristalinidade de um polímero tem influência nas suas propriedades mecânicas e térmicas. Na fusão, ocorre à transformação de um material sólido com estrutura ordenada em um líquido viscoso com estrutura altamente aleatória. Na transição vítrea os polímeros amorfos ou semicristalinos são resfriados a partir de um líquido fundido tornando-se sólidos rígidos, apesar de conterem uma estrutura molecular desorganizada que é característica do estado líquido (CALLISTER, 2008).

A temperatura de fusão (T_f) para os polímeros semicristalinos, e a temperatura de transição vítrea (T_g), para os polímeros amorfos, são as principais transições térmicas dos polímeros, uma vez que, estão associadas com a mudança de estado físico dos materiais (DALFRÉ, 2007).

4.4.1 Classificação dos polímeros

Popularmente, os polímeros são definidos como plásticos devido à propriedade de plasticidade que a maioria dos polímeros apresenta, ou devido ao fato de os polímeros passarem por esse estado físico para a sua ordenação. Entretanto, polímeros e plásticos diferem-se (ANDRADE, 2007).

A palavra 'plástico' vem do grego *plastikós*, que significa adequado à moldagem. Os plásticos industriais são de origem sintética. Exceções, como o acetato de celulose, são obtidos por modificação química de polímeros naturais (MANO; MENDES, 2004). Os plásticos apresentam rigidez estrutural quando submetidos a uma carga e são usados em aplicações de uso geral (CALLISTER, 2008).

Os polímeros podem ser classificados quanto à sua natureza em naturais ou sintéticos; quanto à fusibilidade, em termoplásticos ou termofixos; e por diversos outros critérios, como a disposição espacial dos monômeros, a morfologia no estado sólido e a técnica de polimerização empregada (GAUTO; ROSA, 2011).

Os polímeros naturais são aqueles presentes nos seres vivos como o ácido desoxirribonucleico (DNA), o ácido ribonucleico (RNA), as proteínas e alguns

carboidratos; e aqueles que provém de seres vivos como a celulose, lignina, lã e seda (ASHBY; JONES, 2007; GAUTO; ROSA, 2011).

Os polímeros sintéticos são produzidos pela indústria petroquímica. Alguns exemplos são: PVC (policloreto de vinila), PEAD (polietileno de alta densidade), PEBD (polietileno de baixa densidade), PS (poliestireno), PP (polipropileno), PET (politereftalato de etileno), fibras, resinas e elastômeros (GAUTO; ROSA, 2011).

Os polímeros termoplásticos, são descritos como polímeros lineares, nos quais as cadeias não apresentam ligações cruzadas, embora possam se ramificar ocasionalmente, explicando o fato de amolecerem quando aquecidos (ASHBY; JONES, 2007).

Os termofixos são polímeros infusíveis e insolúveis, compostos por longas cadeias lineares ou ramificadas de moléculas muito ligadas umas às outras para formar estruturas de rede tridimensional. São mais resistentes, porém mais frágeis que os termoplásticos. Os termofixos não se fundem quando aquecidos, mas decompõem-se. Não são reprocessados com facilidade depois da reação de reticulação, tornando difícil sua reciclagem (ASKELAND; WRIGHT, 2016).

4.4.1.1 **Polímeros termoplásticos**

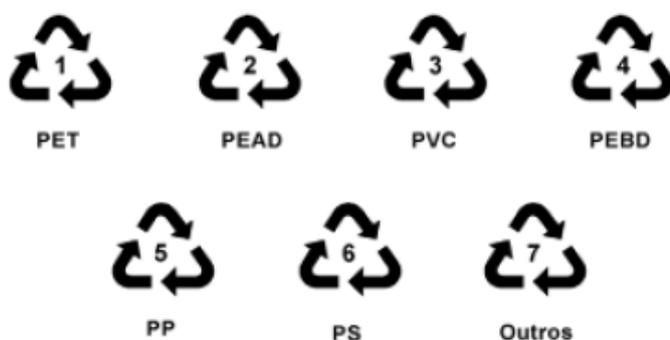
Tal qual Askeland e Wright (2016), os termoplásticos são compostos de cadeias longas decorrentes da união dos monômeros. Apresentam comportamento mecânico plástico e dúctil. As cadeias podem ou não ser ramificadas, e cadeias individuais entrelaçadas. Há ligações fracas, do tipo van der Waals, entre átomos de diferentes cadeias. Os termoplásticos podem ser amorfos, sem estrutura atômica definida, ou parcialmente cristalinos. Sob aquecimento, amolecem-se e fundem-se, adquirindo a forma de qualquer objeto. O aumento da temperatura quebra as fracas ligações secundárias permitindo a movimentação entre as cadeias (SMITH; HASHEMI, 2012; TOLENTINO, 2015). Polímeros termoplásticos amolecem, e se liquefazem, quando são aquecidos e endurecem quando resfriados, processo reversível e repetitivo. A degradação é irreversível quando a temperatura do polímero termoplástico fundido é aumentada ininterruptamente (CALLISTER, 2008).

Uma vantagem dos polímeros termoplásticos é a possibilidade de remoldagem sob aplicação de novas temperaturas, sendo, portanto, recicláveis. Os termoplásticos não apresentam um reticulado cristalino predominante, e a capacidade de fundir em

determinadas temperaturas está diretamente relacionada com essa característica. São materiais de baixo custo, alta produção, facilidade de processamento e baixo nível de resistência mecânica (ANDRADE, 2007; MILAGRES, 2004).

Os termoplásticos de maior importância industrial são o PET, o PEAD, o PEBD, o PS, o PVC, o PP e o ABS, os quais amolecem a baixa temperatura (MANO; MENDES, 2004). A FIG. 3 ilustra a simbologia para identificação dos termoplásticos em embalagens poliméricas.

Figura 3 – Simbologia para identificação de embalagens poliméricas



Fonte: ABNT - NBR 13230.

O PET, FIG. 4 (a), é um polímero termoplástico apresentado nos estados amorfo (transparente), parcialmente cristalino (translúcido) e altamente cristalino (transparente). Com brilho, alta resistência mecânica, química e térmica. É um polímero de alta densidade que amolece entre 73°C e 80°C (AMARAL; SANTANA, 2009; GAUTO; ROSA, 2011). Possui MM de 4×10^4 g/mol, T_g entre 70-74°C e T_f entre 250-270°C. Apresenta inúmeras aplicações, como fibra (na indústria têxtil, mantas para filtros industriais e para contenção de encostas), como artefato (componentes nas indústrias automobilística e eletroeletrônica, embalagem de alimentos, cosméticos e produtos farmacêuticos, frascos para bebidas gaseificadas), e como filme (fitas magnéticas, radiografia, fotografia e reprografia) (MANO; MENDES, 2004).

O PEAD, FIG. 4 (b), é um polímero de cadeias lineares, com baixo número de ramificações, o que confere maior cristalinidade, até 95%, e densidade ao material. Apresenta uma elevada rigidez e resistência à tração (ANDRADE, 2007). É um termoplástico branco, opaco, com temperatura de amolecimento entre 120°C e 132°C (GAUTO; ROSA, 2011; AMARAL; SANTANA, 2009). Apresenta MM de 10^5 g/mol, T_g

de -120°C e T_f de 135°C . Possui aplicações em contêineres, reservatórios plásticos, fita-lacre de embalagens e material hospitalar (MANO; MENDES, 2004).

O PEBD, FIG. 4 (c), é um polímero com cadeias ramificadas, parcialmente cristalino, até 60%, de baixa densidade. As cadeias ramificadas entrelaçam-se, produzindo um material macio e bastante flexível. É um termoplástico branco, de translúcido a opaco, com temperatura de amolecimento entre 85°C e 105°C (AMARAL; SANTANA, 2009). Apresenta uma boa tenacidade, satisfatória resistência ao impacto e resistência a algumas soluções aquosas, inclusive a elevadas temperaturas (ANDRADE, 2007; GAUTO; ROSA, 2011). Possui MM de 5×10^4 g/mol, T_g de -20°C e T_f de 120°C . É utilizado em aplicações de filmes e frascos para embalagens de produtos alimentícios, farmacêuticos e químicos, utensílios domésticos e brinquedos (MANO; MENDES, 2004).

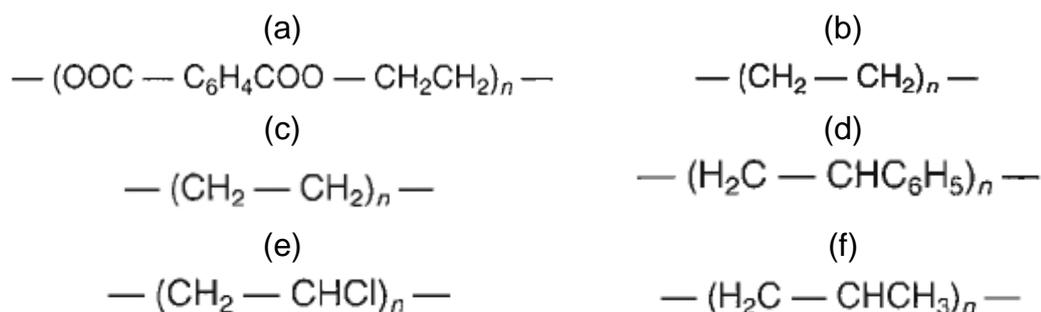
O PS, FIG. 4 (d), é um material amorfo e termoplástico com baixa resistência aos solventes (GAUTO; ROSA, 2011). Apresenta elevada resistência à tração, amolecendo em temperaturas entre 90°C e 95°C (ANDRADE, 2007). Apresenta MM de 10^6 g/mol e T_g de 100°C . Possui aplicações em utensílios domésticos de uso geral, brinquedos, embalagens para cosméticos e alimentos e placas expandidas (MANO; MENDES, 2004).

O PVC, FIG. 4 (e), possui excelente resistência química e elevada resistência à chama. É um termoplástico com baixa cristalinidade, 5-15%, rigidez elevada e plastificável em ampla faixa, amolecendo em temperaturas entre 80°C e 100°C (ANDRADE, 2007; GAUTO; ROSA, 2011; MANO; MENDES, 2004). Com MM entre 10^4 - 10^5 g/mol, T_g de 81°C e T_f de 273°C , possui aplicações em forração de móveis e de estofamentos de carros, revestimentos de fios e cabos elétricos, tubulações para água e esgoto, pisos, embalagens rígidas e transparentes para alimentos, toalhas de mesa, cortinas de chuveiro, calçados, bolsas e roupas imitando couro, carteiras transparentes para identificação e bonecas (MANO; MENDES, 2004).

O PP, FIG. 4 (f), é um polímero incolor, inodoro, de baixa densidade, ótima dureza superficial, alta cristalinidade, 60-70%, e facilidade de moldagem. Possui uma moderada resistência mecânica, boa resistência química e térmica, degrada-se sob a ação dos raios ultravioleta, e amolece entre 150°C e 160°C (ANDRADE, 2007; GAUTO; ROSA, 2011; MANO; MENDES, 2004). Possui MM entre 10^4 - 10^5 g/mol, T_g entre 4 - 12°C e T_f entre 165 - 175°C . Apresenta aplicações em para-choques de automóveis, carcaças de eletrodomésticos, recipientes em geral, fita-lacre de

embalagens, brinquedos, sacaria, carpetes, tubos para canetas esferográficas, válvulas para aerossóis, material hospitalar e recipientes para uso em fornos de microondas (MANO; MENDES, 2004).

Figura 4 – Estrutura dos polímeros termoplásticos (a) PET (b) PEAD (c) PEBD (d) PS (e) PVC (f) PP



Fonte: MANO; MENDES; 2004, p. 92-118.

O ABS, $(\text{C}_3\text{H}_3\text{N}.\text{C}_4\text{H}_6.\text{C}_8\text{H}_8)_n$, também denominado plástico de engenharia, é derivado de três monômeros: acrilonitrila (20% a 30%), butadieno (20% a 30%) e estireno (20% a 60%). Materiais de ABS destacam-se pelas características de engenharia, como boa resistência ao impacto e mecânica, combinadas com fácil processamento. É um termoplástico que amolece a 97°C com T_f entre 225°C e 245°C, muito utilizado por ser relativamente barato, muito resistente e, ao mesmo tempo, leve e flexível. A vasta escala de propriedades úteis na engenharia provém das propriedades combinadas de cada componente: a acrilonitrila contribui com o aumento das resistências química e ao calor, e da tenacidade; o butadieno contribui com a melhoria na resistência ao impacto e baixa retenção de água; e o estireno fornece brilho superficial, rigidez e facilidade de processamento (PLÁSTICO VIRTUAL, 2016; SMITH; HASHEMI, 2012).

4.4.2 Aditivos

Os aditivos são materiais adicionados propositalmente ao polímero para torná-lo mais adequado para certa condição de aplicação. Essa adição é necessária para modificar as propriedades físicas, químicas e mecânicas em um nível superior por meio de alterações na estrutura molecular fundamental. Aditivos típicos incluem as

cargas, os plastificantes, os estabilizadores, os colorantes (corantes e pigmentos), e os retardantes de chama (ANDRADE, 2007; CALLISTER, 2008; TOLENTINO, 2015).

As cargas são substâncias orgânicas ou inorgânicas que conferem um aumento da resistência mecânica, da rigidez e da densidade do produto final ao serem adicionadas aos polímeros. As cargas de reforço são aquelas que aumentam a resistência mecânica dos polímeros, como a fibra de vidro, e as cargas de diluição são aquelas que tornam mais barata sua produção, como a serragem e o pó de madeira (ALMEIDA; SOUZA, 2015; TOLENTINO, 2015).

Os plastificantes são substâncias de alto ponto de fusão devendo apresentar compatibilidade e miscibilidade com o polímero (TOLENTINO, 2015). A adição de plastificantes facilita a moldagem, conferindo maior flexibilidade, ductilidade e tenacidade dos polímeros (ANDRADE, 2007; CALLISTER, 2008).

Os estabilizantes são utilizados para preservar as características originais de um material polimérico, atuando contra o processo de deterioração dos materiais poliméricos, em termos de sua integridade mecânica, quando expostos à radiação ultravioleta, à oxidação ou a temperatura (ALMEIDA; SOUZA, 2015; ANDRADE, 2007; CALLISTER, 2008; TOLENTINO, 2015).

Os corantes são aditivos colorantes orgânicos solúveis, os quais conferem cor específica e alto brilho aos polímeros. Os pigmentos são colorantes orgânicos ou inorgânicos, insolúveis, utilizados para encobrir defeitos de fabricação no polímero, conferindo cor e opacidade, servindo como barreira aos ataques dos raios ultravioleta e, conseqüentemente, conferindo maior estabilidade química (ALMEIDA; SOUZA, 2015; ANDRADE, 2007; TOLENTINO, 2015).

Os aditivos retardadores de chama (componentes fosforados, hidróxido de alumínio, cianeto de melanina) aumentam a resistência à inflamabilidade ao iniciar uma reação química que diminua a temperatura no local da queima ou interfira na combustão, sem alterar as propriedades mecânicas e físicas dos polímeros. Dessa forma, evita-se que o material inflame, que a chama se espalhe, que forme fumaça, ou que o polímero pingue quando queimado (ANDRADE, 2007; TOLENTINO, 2015).

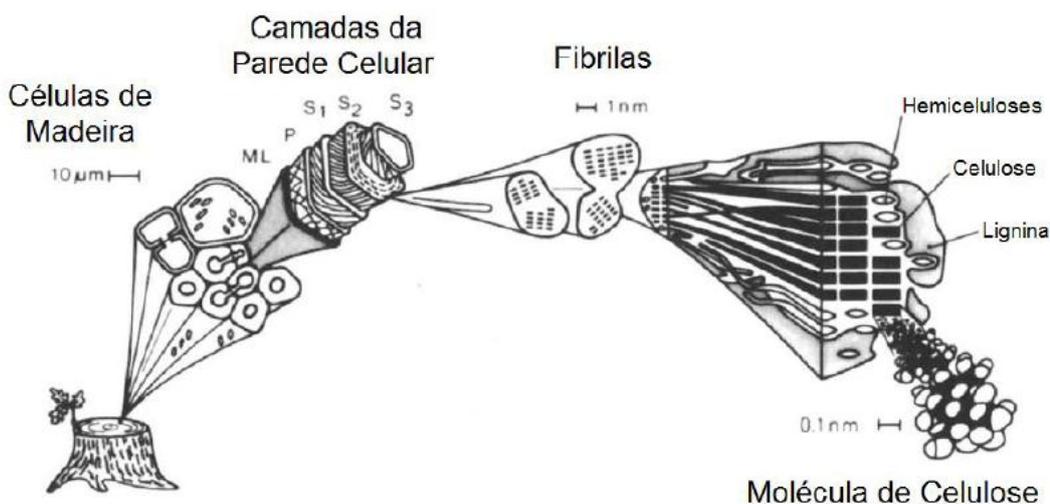
4.5 Madeira

A madeira é, provavelmente, o material estrutural utilizado a mais tempo devido à sua disponibilidade na natureza e facilidade de manuseio, sendo ainda o mais

utilizado (ASHBY; JONES, 2007; PFEIL, W.; PFEIL, M., 2012). É considerada uma matéria-prima moderna e renovável, o que a torna um bem de inigualável valor para a humanidade (KOLCK; ANDRADE, 2013).

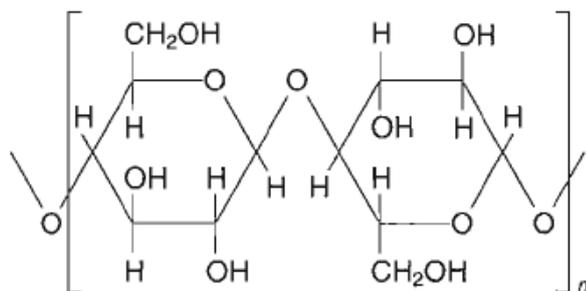
A madeira é um importante material da engenharia convencional e, também, uma imensa riqueza renovável à disposição do homem. É um compósito natural de extrema complexidade, no qual as fibras de celulose representam os elementos de resistência, e a lignina representa o material aglutinante (FIG. 5). A parede celular vegetal é formada por uma estrutura complexa de materiais lignocelulósicos, os quais são constituídos de três tipos de polímeros naturais: a celulose, a hemicelulose e a lignina. A celulose, FIG. 6, é um polímero linear de glicose de alta *MM*, insolúvel em água, com coloração de incolor a branco, sendo o principal componente do vegetal, cerca de 50% do peso. A hemicelulose é uma mistura de polímeros polissacarídeos de baixa *MM*, representando cerca de 20% do peso do vegetal. A lignina é o ligante que mantém as fibras unidas, conferindo firmeza e rigidez ao conjunto de fibras de celulose, responsável por 15% a 35% do peso do vegetal; é formada por polímeros amorfos de composição complexa e não definida, contendo a presença de grupos fenólicos na estrutura e cor variável entre esbranquiçada e marrom. Os constituintes minoritários representam até 10% do peso do vegetal, incluindo compostos orgânicos e inorgânicos divididos em extrativos e não extrativos (GAUTO; ROSA, 2011; MANO, 1991; TOLENTINO, 2015).

Figura 5 – Parede celular vegetal da madeira



Fonte: HOFFMANN; JONES, 1989 apud NOVO; 2016, p. 28.

Figura 6 – Estrutura da celulose



Fonte: MANO; MENDES; 2004, p.110.

A madeira apresenta aspecto visual decorativo e é processada sem dificuldades. Apesar de sua inflamabilidade a altas temperaturas, mostra desempenho superior ao de outros materiais em condições extremas de exposição. Sendo um mau condutor de calor, mantêm-se em serviço em condições em que o aço já teria entrado em colapso, mesmo não sendo inflamável. Embora sensível ao apodrecimento e ao ataque de cupins e brocas, a madeira tem sua durabilidade natural prolongada quando tratada com substâncias preservativas (CABRAL et al., 2016; CALIL; LAHR; BRAZOLIN, 2007).

As características da madeira são influenciadas pelas diferentes condições de temperatura, composição e umidade do solo no local de crescimento da árvore, densidade do povoamento e posição da árvore na floresta. As variações são significativas mesmo tratando-se de árvores da mesma espécie (CALIL; LAHR; BRAZOLIN, 2007).

A escolha das espécies de madeiras para uso específico é uma das etapas mais importantes a serem cumpridas para que haja bom desempenho do material pretendido. O uso da madeira de reflorestamento foi desenvolvido para suprir as várias necessidades de utilização da madeira e também para preservação de florestas nativas. Na década de 1960, o Brasil optou pelos gêneros pinus e eucalipto para o programa de reflorestamento, devido ao clima tropical e semitropical (CALIL; LAHR; BRAZOLIN, 2007; GAUTO; ROSA, 2011).

4.6 Agentes compatibilizantes

Um dos desafios na produção de um material compósito é melhorar a união entre os materiais de natureza diferente que o constitui. No caso dos CPM, a mistura

de resinas termoplásticas com farinha de madeira resulta em pouca ou nenhuma adesão interfacial, devido a incompatibilidade entre os componentes. Os agentes compatibilizantes (AC) ou agentes de ligação melhoram a adesão entre as superfícies hidrofílicas da madeira e hidrofóbicas dos polímeros termoplásticos, sendo, portanto, essenciais na fabricação dos compósitos termoplásticos para gerar produtos com melhores propriedades mecânicas (MILAGRES, 2004). A compatibilidade entre o polímero e a fibra pode ser melhorada pela modificação da matriz apolar, através da aplicação de um grupo polar, como o anidrido maleico (AM) ($C_4H_2O_3$ ($C=OCH=CHC=O_2$)) (LU; WU; MCNABB, 2000; RABELLO, 2000).

Os AC classificam-se em orgânicos, inorgânicos e orgânicos/inorgânicos. Os agentes orgânicos possuem grupos bi- ou multifuncionais, como os ($-N=C=O$) dos isocianatos, $[-(CO)_2O-]$ do AM e ($-Cl-$) dos derivados diclorotriazino, que interagem com os grupos polares da celulose e lignina, formando ligações covalentes ou ligações de hidrogênio. O silicato de sódio é um dos raros agentes inorgânicos utilizados, o qual possibilita a ação dispersante que neutraliza a polaridade superficial das fibras de madeira e melhoram a compatibilidade entre a fibra e o plástico. Agentes orgânicos/inorgânicos são compostos híbridos que possuem grupos orgânicos e inorgânicos, os quais incluem silanos e titanatos (CÔRREA, 2004; LU; WU; MCNABB, 2000; MACIEL, 2001; MILAGRES, 2004).

Na madeira ecológica, o deslocamento de tensões da matriz polimérica para as fibras de reforço ocorre na região de interface, região de comunicação entre o polímero apolar e a carga polar. Essa interface tem papel decisivo nas propriedades mecânicas do compósito, sendo que uma boa adesão resultará em boas propriedades mecânicas. A seleção de AC baseia-se na forte interação com as fibras de reforço por meio de ligações covalentes fortes ou em interações secundárias do tipo ácido-base ou ligações de hidrogênio. O compatibilizante reduz a tensão interfacial entre a carga e o polímero, aumenta a adesão entre as fases, e estabiliza a carga. O compatibilizante mais utilizado em CPM é o anidrido maleico grafitizado em poliolefinas. Utilizam-se também as poliolefinas grafitizadas com acrilatos de metila e com ionômeros contendo íons metálicos (CATTO, 2015).

A adesão entre as fibras de celulose e as substâncias compatibilizadoras devem-se às ligações químicas entre as hidroxilas ($-OH$) da celulose e os grupos específicos presentes na estrutura do agente compatibilizante (MACIEL, 2001). Caso a adesão não seja perfeita, surgirão vazios na região interfacial, provocando a

fragilização do material. Normalmente a falha de um compósito origina-se da quebra da interface e não da quebra de um dos componentes (RABELLO, 2000).

Além dos aspectos químicos ligados a compatibilização da madeira com o polímero, o desempenho do compósito depende de fatores como a quantidade de carga, distribuição granulométrica do reforço e distribuição do reforço na matriz polimérica (CORREA et al., 2003; RABELLO, 2000).

4.7 Reciclagem

Com o surgimento do conceito de desenvolvimento sustentável, entendeu-se a necessidade de uma produção mais limpa das atividades industriais e de políticas ambientais. A diversidade de resíduos varia de acordo com as inúmeras atividades humanas e produtivas, e o seu reaproveitamento é possível por meio da recuperação de substâncias que não reagiram nos processos e de subprodutos descartados (BARBOSA; IBRAHIN, 2014).

Um material deixa de ser resíduo quando é valorizado como matéria-prima para a obtenção de novos produtos. A ecologia industrial objetiva a prevenção da poluição pela redução da necessidade de matérias-primas e energia, assim como a diminuição da devolução de resíduos e poluentes à natureza. O que é considerado resíduo em um processo produtivo pode ser aproveitado como matéria-prima em outro processo (TEIXEIRA, 2005).

Reciclar é poupar energia, reduzir o uso de recursos naturais e retornar ao ciclo produtivo o que é jogado fora. O resíduo é fonte de riqueza. No Brasil, em 2011, foram desperdiçados R\$ 4,6 bilhões pelo fato de não ter sido reciclado todo o resíduo disponível. A reciclagem manifestou-se como uma maneira de reutilizar parte da matéria e energia que se tornaria resíduo, os quais são coletados, separados e processados para serem reutilizados como matéria-prima na produção de bens que eram feitos com matéria-prima virgem, fazendo com que os recursos naturais fiquem menos comprometidos. Dessa forma, contribui-se com a diminuição da poluição do solo, da água e do ar (NANI, 2011).

4.7.1 Resíduos plásticos

O lixo é definido como todo e qualquer rejeito sólido proveniente da atividade humana, seja doméstica, industrial ou agrícola (GUAMÁ et al., 2008).

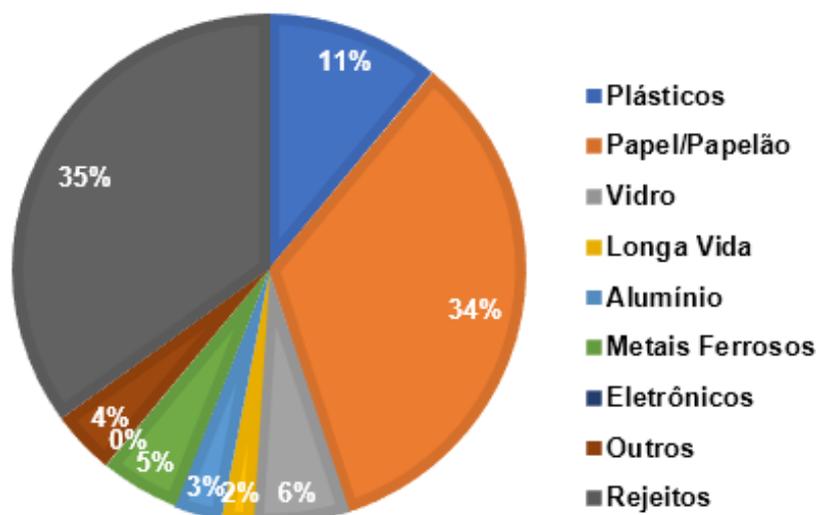
Os polímeros são os materiais que mais aparecem no lixo urbano. Os resíduos plásticos, são na maioria termoplásticos, como embalagens de refrigerante, sucos e alguns produtos de limpeza (PET); garrafas de álcool, de produtos químicos, de higiene e limpeza doméstica (PEAD); embalagens de alimentos, sacos industriais e de lixo (PEBD); frascos de água mineral, calçados, tubos e conexões para água (PVC); potes de margarina e seringas descartáveis (PP); copos descartáveis, placas isolantes e material escolar (PS) (BARBOSA; IBRAHIN, 2014; GUAMÁ et al., 2008).

A reciclagem de polímeros classifica-se em quatro categorias: primária, secundária, terciária e quaternária. As reciclagens primária e secundária são conhecidas como reciclagem mecânica ou física, e o que difere uma da outra é que na primária utiliza-se polímero pós-industrial e na secundária polímero pós-consumo. A reciclagem terciária é conhecida como reciclagem química e a quaternária como reciclagem energética (ALMEIDA, 2013).

A reciclagem primária ou pré-consumo é a conversão de resíduos poliméricos pós-industriais por métodos de processamento padrão em produtos equivalentes àqueles produzidos por polímeros virgens. A reciclagem secundária ou pós-consumo é a modificação de plásticos provenientes do lixo pós-consumo em produtos com desempenho inferior quando comparados ao material original, devido à mistura com restos de alimento, vidros, papel, entre outros. Minimiza-se tal problema com a aplicação da coleta seletiva ao se separar os diversos tipos de materiais presentes no lixo, evitando assim a contaminação dos plásticos. A reciclagem terciária ou reciclagem química não é utilizada em grande escala devido ao seu alto custo, e consiste na degradação do polímero em materiais primários, que passam novamente por processos de polimerização, como a produção de insumos químicos ou combustíveis a partir de resíduos poliméricos. (MILAGRES, 2004). Na reciclagem quaternária ou reciclagem energética incinera-se o material com o objetivo de aproveitar o calor gerado para a produção de energia (AMARAL; SANTANA, 2009).

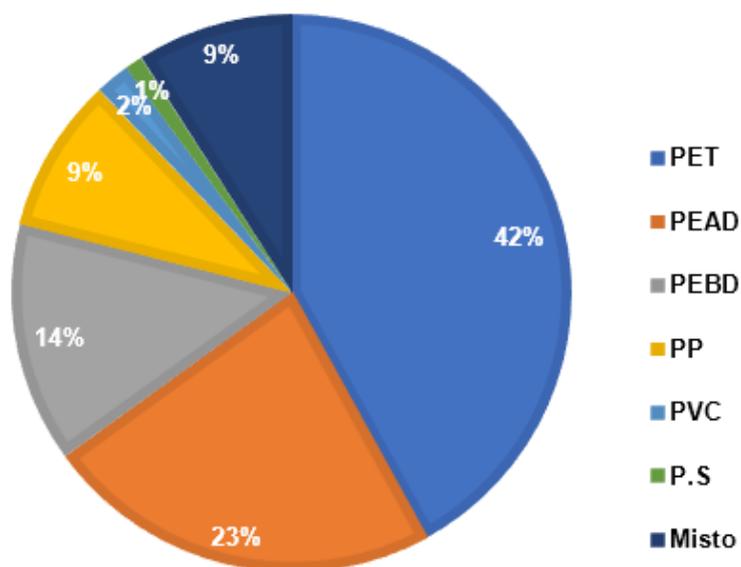
No Brasil são gerados, aproximadamente, 500 mil toneladas de resíduos por ano. Desse total, apenas 11% são plásticos, FIG. 7, e um dos maiores obstáculos é a variedade de tipos de plásticos (FIG. 8) (CEMPRE, 2016).

Figura 7 – Gráfico da composição dos resíduos sólidos na coleta seletiva



Fonte: Adaptado de CEMPRE, 2016.

Figura 8 – Gráfico dos tipos de plásticos encontrados no volume total de resíduos disposto nos aterros sanitários no Brasil em 2016



Fonte: Adaptado de CEMPRE, 2016.

A fabricação de plástico reciclado reduz em 70% o consumo de energia em relação à produção de plástico virgem, considerando desde a exploração da matéria prima até o produto final. Globalmente, 18% do plástico é reciclado, mas é importante ressaltar que nem todos os plásticos podem ser reciclados (NANI, 2011; PARKER, 2018).

4.7.2 Resíduos madeireiros

A indústria madeireira atua no processamento da madeira, que é extraída por meio da exploração vegetal. Além da poluição, deve-se seguir uma gestão ambiental que discipline a exploração de recursos naturais, previna o desflorestamento em matas nativas e conserve os ecossistemas essenciais. Além de ser utilizada como recurso energético, a madeira pode ser beneficiada para a produção de materiais derivados. Dentre os resíduos lignocelulósicos mais utilizados para este fim têm-se a serragem, oriunda da ação mecânica de serras e máquinas de corte da madeira; o pó de lixa, procedente do processo de lixamento, acabamento de uma peça; e outros particulados gerados desde o transporte até a indústria. A poeira particulada é o primeiro impacto observado em serrarias. Há também o risco adicional à saúde e ao meio ambiente se a madeira for tratada ou revestida por elementos químicos de conservação e acabamento (BARBOSA; IBRAHIN, 2014; TEIXEIRA, 2005).

A indústria madeireira usa os recursos naturais de maneira ineficiente, tanto na obtenção da matéria prima quanto na produção dos produtos finais, como também no descarte dos mesmos, gerando grande exploração dos recursos madeireiros, principalmente das florestas nativas. A grande geração de resíduos é a prova desta ineficiência. Tudo que não serve para comércio regular vira lixo ou é queimado. Os resíduos da serragem, por exemplo, nem sequer são depositados de forma adequada, e quando queimados contribuem com aumento da poluição do ar provocando danos ao meio ambiente e a população. A utilização do resíduo madeireiro industrial na transformação de produtos é uma grande resposta ao meio ambiente, gerando produtos com maior valor agregado, diminuindo o desmatamento, reduzindo a poluição e promovendo o equilíbrio ecológico (TEIXEIRA, 2005).

As empresas que utilizam a madeira como matéria prima enfrentam dificuldades devido à diminuição das florestas e limitações para extração, tornando a extração menos lucrativa devido à elevação do custo da matéria-prima. A distância cada vez maior entre a fonte originadora de madeira e a indústria de processamento contribui com o aumento dos custos de produção. Por este motivo as empresas buscam madeiras alternativas de fácil alcance sem elevar os custos (CORTEZ; CUNHA, 2013).

O processo produtivo de móveis de madeira gera uma alta quantidade de resíduos, o que se constitui um problema de gestão ambiental. Embora a maior perda

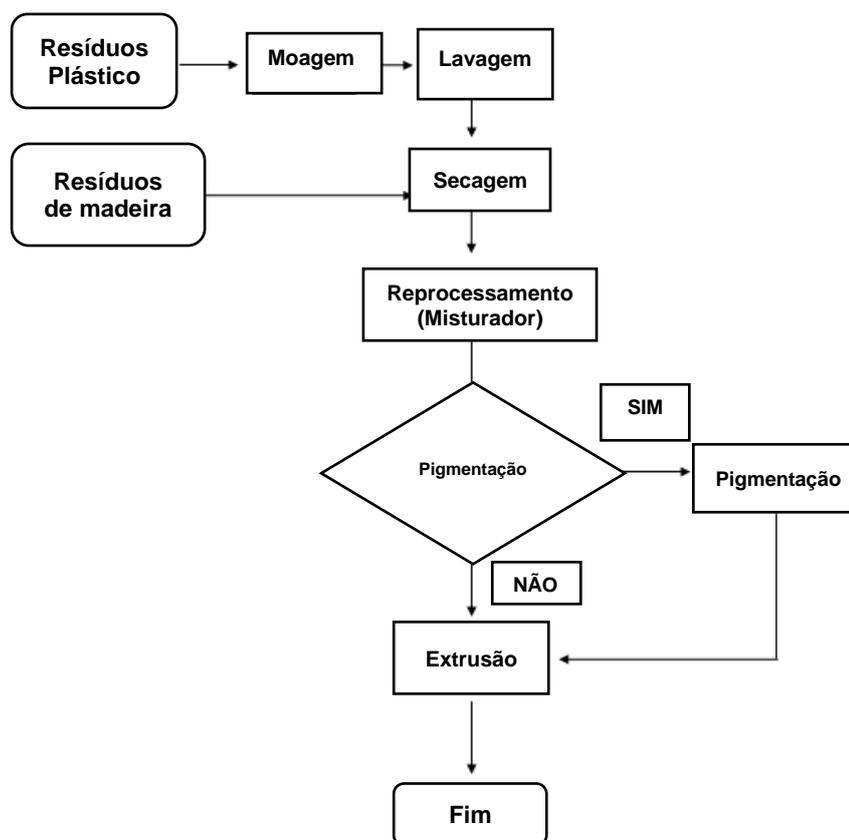
de resíduos de madeira ocorra em seu processamento primário, nas indústrias de móveis ocorrem perdas residuais nas operações de corte e de acabamento (HILLIG; SCHNEIDER; PAVONI, 2009).

Em 2012, os resíduos de madeira gerados no Brasil foram estimados em 30 milhões de toneladas. A principal fonte de resíduos é a indústria madeireira, a qual contribui com 91% dos resíduos gerados. Em serrarias, metade da madeira vira resíduo, ou seja, a perda média chega a 50%. Entre os principais equipamentos presentes nas serrarias, os que mais geram resíduos são a serra de fita, que gera a serragem, e a lixadeira que gera o pó de lixa. O principal resíduo gerado pelas serrarias é a serragem, 36,17%. Em relação à destinação dos resíduos gerados pelas serrarias, a maioria das empresas (55%) realiza a venda dos resíduos para a geração de energia em cerâmicas, 17% realizam a venda dos resíduos para utilização em baias de animal, 16% doam a interessados, 8% descartam em lixões e 2% utilizam para confecção de pequenos artefatos de madeira (CERQUEIRA et al., 2012).

4.8 Processo produtivo do CPM

A etapa inicial da produção do CPM é a coleta da matéria-prima: lixo plástico e resíduos de madeira. Os termoplásticos empregados na produção são originados do material de refugo dos processos industriais de produção ou dos rejeitos pós-consumo, sendo que os mais utilizados são PEAD e PEBD. Após a coleta o plástico é separado por gênero, distinguindo-se os plásticos brancos dos coloridos, visto que o branco produz perfis de cores claras. Depois de selecionado, o plástico passa pela moagem, lavagem e secagem. Um aspecto importante referente ao processo produtivo desses compósitos é a umidade. Os polímeros retêm água no processo de reciclagem, e passam pelo processo de secagem, e o resíduo madeireiro sem uma pré-secagem limita a produção a uma formulação com conteúdo máximo de 40% de madeira. A segunda etapa é o reprocessamento, onde os grânulos são fundidos e homogeneizados em uma extrusora (FIG. 9). Os resíduos madeireiros utilizados provêm de indústrias moveleiras e são, quase que integralmente, de madeiras de reflorestamento de pinus e eucalipto. Surgindo a necessidade de utilização de espécies alternativas de rápido crescimento, utilizam-se o eucalipto, ou proporções equivalentes de pinus e eucalipto (IWAKIRI et al., 2000; MACIEL, 2001; YAMAJI, 2004).

Figura 9 – Fluxograma do processo de extrusão

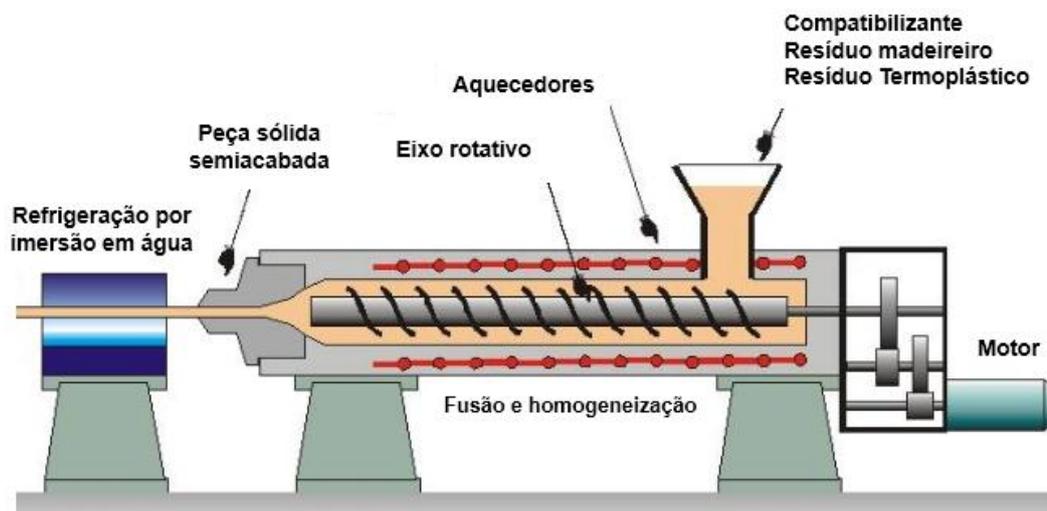


Fonte: Adaptada de OLIVEIRA, 2007.

As técnicas utilizadas para produção de peças ou componentes poliméricos dependem da natureza dos polímeros, em especial, se ele é termoplástico ou termofixo (ASKELAND; WRIGHT, 2016).

A extrusão é a técnica mais utilizada no processamento de termoplásticos, funcionando como um misturador eficiente entre os aditivos compatibilizantes, os resíduos lignocelulósicos e os polímeros. No processo de extrusão, o termoplástico, o compatibilizante polimérico e o resíduo madeireiro são alimentados, através de um funil, em um cilindro aquecido, e em seguida são forçados por um fuso rotativo por meio de uma abertura em uma matriz precisa com a formação de uma peça sólida contínua semiacabada. Após sair da matriz, a parte extrudada é resfriada, por intermédio de um sistema de resfriamento por água, abaixo de sua temperatura de transição vítrea, para garantir estabilidade dimensional (FIG. 10). A extrusora opera em faixas específicas de temperaturas de acordo com o plástico utilizado (ASKELAND; WRIGHT, 2016; SMITH; HASHEMI, 2012).

Figura 10 – Processo de extrusão.



Fonte: Adaptada de CENSA INDUSTRIAL, 2018.

4.9 Aplicações da madeira ecológica

Compósitos de matriz polimérica reciclada, reforçados com farinha de madeira encontram grande aceitação no mercado em aplicações para construção civil como perfis para piso e assoalhos, batentes de janelas, portas e revestimentos; e como componentes automobilísticos, graças à leveza, multifuncionalidade e baixo custo quando equiparado com a madeira natural ou outros compósitos poliméricos reforçados com cargas minerais. Podem ser uma alternativa viável para a substituição da madeira e de polímeros virgens (BATTISTELLE et al., 2014; CATTO, 2015).

A madeira inteligente está sendo estudada e desenvolvida no Brasil, e no resto do mundo, como alternativa de reciclagem e reaproveitamento dos polímeros termoplásticos pós-consumo e dos resíduos madeireiros, tendo como objetivo a substituição da madeira em objetos externos ou internos. Exemplos de aplicação incluem bancos de praça, bancos de jardim, brinquedos infantis para parque, instalações para lixo, cobertura de pontes, cobertura de pátios, escadas, corrimãos, guardas de sacadas, estrados para a criação de porcos, decks de piscina, revestimentos antiderrapantes, vasos para flores, painéis automotivos, cabides, dormentes de trilhos, pallets para transporte e armazenamento de mercadorias, móveis escolares, moirões para cerca, caixotes, assentos de cortadores de grama, ou mesmo para substituição do ferro fundido em tampas de instalações subterrâneas e bocas de lobo de esgotos pluviais (AMARAL; SANTANA, 2009; ENGLISH et al., 1996).

O CPM é um substituto ecológico da madeira natural em diversas aplicações. Na fabricação de móveis, é utilizada principalmente na produção de bancos de jardim e cadeiras, usados em parques e praças por não apodrecer, nem sofrer ação de umidade e pragas, mantendo a paisagem sempre bonita. Também possui utilização na produção de decks, pois um deck de madeira ecológica não necessita de vedação, pintura, lixamento e substituição periódica de tábuas danificadas, além de ser menos escorregadia que a madeira natural quando molhada, não soltar farpas, não rachar, e ser proveniente de materiais reciclados. Na presença de certos aditivos cria-se um compósito resistente a cargas pesadas, com aplicação na produção de tampas de bueiro que normalmente são feitas de ferro fundido, um material com alto preço no mercado que vem sendo frequentemente roubado. Outra de suas diversas aplicações é a utilização em dormentes de trilhos, utilizada por várias ferrovias no Brasil, devido ao fato de não racharem, não trincarem, não conduzirem eletricidade, absorverem as vibrações preservando o material e a geometria da via, leveza e impermeabilidade a água e resistência a efeitos de pragas (OHARA, 2011).

A madeira ecológica substitui a madeira natural com vantagens, visto que ao aumentar a produtividade aumentará suas aplicações (GUAMÁ et al., 2008).

4.10 Vantagens, limitação e desvantagem da madeira ecológica

A madeira ecológica apresenta vantagens em relação a madeira convencional. Algumas dessas vantagens são a baixa necessidade de manutenção, a ausência de agentes preservativos para sua proteção e a não-liberação de substâncias tóxicas ao longo de sua vida útil (MACIEL, 2001). A estrutura do material plástico oferece proteção às partículas de madeira, o que permite o emprego desses produtos nas condições adversas do meio ambiente. A matriz de plástico envolve as partículas de madeira, impedindo que se expanda, aumentando com isso a estabilidade do produto elaborado. Além disso, são leves e apresentam boa resistência aos esforços de impacto. Superfície antiderrapante, impermeabilidade, resistência a maresia, resistência a corrosão, resistência ao apodrecimento, durabilidade e reciclabilidade (ENGLISH et al., 1996).

Outra importante vantagem é que o processo produtivo de tal compósito possibilita a ocorrência de um caminho inverso, preservando o meio ambiente e evitando o desmatamento. Ao contrário da madeira convencional, o compósito é

completamente resistente a pragas, fungos e cupins, principais causadores do enfraquecimento da madeira. A madeira ecológica pode ser pintada, mas a customização do ecocompósito é outro atrativo, podendo-se optar pela cor final do produto utilizando apenas pigmentos no processo de extrusão. Sua textura é bem semelhante a madeira comum, contudo não solta farpas e não precisa ser envernizada (NAZÁRIO et al., 2016).

A versatilidade da madeira ecológica é equivalente à da madeira natural, como a utilização de equipamentos usados na marcenaria e reparos comuns, com maior agarre a pregos e parafusos (OHARA, 2011). Os CPM disponíveis no mercado possuem certificação de 10 anos de garantia, mas estima-se uma durabilidade superior a 100 anos, enquanto a durabilidade da madeira natural é bem limitada. As vantagens continuam no quesito limpeza, onde são necessários apenas água e sabão (NAZÁRIO et al., 2016).

Os ecocompósitos apresentam vantagens competitivas em relação aos compósitos convencionais reforçados com fibra de vidro, carbonato de cálcio e talco, como temperaturas de processamento mais baixas, redução de ciclos de moldagem em produtos injetados resultando em uma maior produtividade, aumento da resistência à tração e flexão, menor peso específico e baixa abrasividade com redução de desgastes de ferramentas (CORREA et al., 2003).

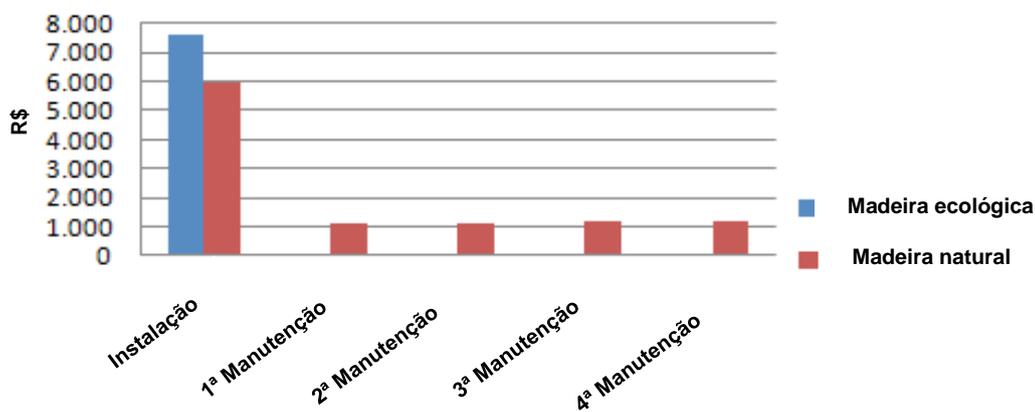
O meio ambiente é o mais favorecido, contudo os benefícios que o ecocompósito promove para a sociedade são excelentes. Com a produção da madeira ecológica há diminuição de lixos sólidos tornando-os reutilizáveis, diminuindo, conseqüentemente, o despejo em aterros sanitários, que ocasionam contaminação do lençol freático. Evita-se o desmatamento de inúmeras árvores, sendo que a cada 50 m² de madeira ecológica produzida um ipê deixa de ser derrubado, e em 2010 2.200.000 ipês foram poupados nos Estados Unidos (NAZÁRIO et al., 2016).

Entretanto, os CPM possuem como limitação a impossibilidade de processamento de polímeros carregados com reforços lignocelulósicos em temperaturas acima de 220°C por longos períodos devido à degradação térmica da carga lignocelulósica (RODOLFO; JOHN, 2006).

A grande desvantagem do uso da madeira ecológica é o alto valor de investimento inicial quando comparado a madeira natural, em média 30% superior, mas a madeira sustentável ultrapassa o capital investido devido à alta durabilidade e

a ausência de gastos com manutenção (FIG. 11) (CABARAL et al., 2016; NAZÁRIO et al., 2016).

Figura 11 – Gráfico comparativo entre custo/benefício dos tipos de madeiras



Fonte: Adaptado de GUIMARÃES et al., 2018, p. 23.

O alto custo da coleta seletiva e o desconhecimento de materiais reciclados por parte da população acabam tornando o mercado desses materiais menos requisitados, e o produto final ainda mais inviável financeiramente. O custo médio da coleta seletiva representa dez vezes o preço da coleta convencional, devido ao fato de o caminhão seletivo não poder compactar o lixo de forma homogênea (CABARAL et al., 2016; GUAMÁ et al., 2008).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são discutidos alguns trabalhos da literatura, nos quais foram comparadas as propriedades físicas e mecânicas do CPM e da madeira natural. Nota-se que as propriedades variam com base na porcentagem de reforço lignocelulósico utilizado nas formulações.

Guimarães (2013), avaliou a produção de madeira ecológica por meio da utilização do PEAD reciclado, e madeira do tipo Paraju, na forma de pó de lixa. A escolha do plástico decorre do fato de que, após o PVC, o polietileno é o mais consumido no Brasil e com maior oferta para reutilização. Em relação à fibra orgânica, escolheu-se a Paraju por ser a mais utilizada no setor imobiliário em Belo Horizonte. O PE30, polietileno com 30% de madeira, absorveu maior quantidade de energia, indicando uma possível vantagem para tal composição em relação às demais, pois quanto maior a porcentagem de resíduos madeireiros, menor é a tensão na força máxima, a tensão na ruptura, o módulo elástico do CPM e a quantidade de energia absorvida por m², já que, com a inserção da fibra lignocelulósica na matriz polimérica, menor é a intensidade das interações entre as cadeias, diminuindo a capacidade do composto em resistir à tração. Uma forma de reverter essa queda nas propriedades mecânicas e amenizar a capacidade de absorção de energia no impacto seria a adição do AM, melhorando a ligação interfacial madeira/plástico, uma vez que, os mesmos possuem polaridade invertida. Observou-se que a inserção da fibra lignocelulósica na matriz polimérica reduz a capacidade de deformação e absorção de energia ao impacto do composto, concluindo-se que a madeira ecológica é um material menos sujeito a deformações em comparação a um polímero puro.

Cortez e Cunha (2013), desenvolveram estudos sobre a confecção de um material compósito a partir da junção de resíduos de PS, copos plásticos, e resíduos da madeira Tauari, apresentando um material que venha a substituir a madeira natural em suas aplicações. Adotou-se a composição de 50% de PS e 50% de pó de madeira, o qual não apresentou quebra durante o manuseio, acabamento superficial satisfatório, boa adesão do reforço na matriz polimérica e uma maior facilidade na remoção do molde. A determinação do PS como material polimérico se deu pela aplicação do solvente, acetona, possibilitando a separação das cadeias poliméricas sem ocorrer degradação. Os resultados do ensaio de absorção de água e densidade aparente, mostram uma propriedade que possibilita a utilização de tal compósito em

locais onde não se aplica a madeira natural, expostos a ambientes úmidos e até mesmo em regiões com influência da maresia. Esses fatores restringem a utilização de material metálico ocasionando alto custo de manutenção, ao contrário da madeira ecológica, viabilizando sua aplicação em movelaria e componentes embarcados.

Battistelle et al (2014), estudou a caracterização física e mecânica de um compósito de PP reciclado e farinha de madeira, sem aditivos. A farinha provém da moagem de resíduos madeireiros sem impurezas, com coloração clara e granulometria uniforme, proveniente da mistura equivalente das espécies *Pinus taeda* e *Pinus elliotti*. No ensaio de absorção de água notou-se valores elevados para o corpo de prova com 30% de madeira, significando que, quanto maior a quantidade de resíduos lignocelulósicos na composição, maior a absorção de água, a qual diminui com a adição de um AC na formulação. A amostra com 10% de madeira obteve melhores resultados em tensão e deformação no escoamento, e a maior resistência ao impacto, enquanto o material com 20% de madeira obteve melhor resultado em tensão na ruptura. O material com 30% de madeira atingiu o maior resultado no módulo de elasticidade longitudinal, e o material com 100% de PP reciclado teve maior índice de deformação na ruptura. Já no ensaio de índice de fluidez, averiguou-se que, quanto maior a quantidade de farinha de madeira menor o índice de fluidez. Os resultados obtidos mostraram a possibilidade de extrusão e injeção do CPM com até 30% de madeira, sem nenhum aglutinante ou compatibilizante nas formulações, visto que o uso do polímero reciclado pode conter, em seu processamento primário, a adição de tais elementos compatibilizantes, tornando seu uso uma vantagem econômica, uma vez que é desnecessário incorporá-los novamente na fabricação.

Grison et al (2015), por sua vez, avaliou as propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos de PEAD com pó de *Pinus taeda*. O AC utilizado para a carga vegetal foi o AM. Os resíduos de *Pinus* foram reaproveitados de materiais de construção civil. A amostra que apresentou o melhor desempenho foi o compósito com 33% de madeira, na qual houve um aumento na resistência à tração e no módulo de elasticidade. A partir da análise do desempenho dos AC, o AM apresentou um bom desempenho nas propriedades devido a reações entre tal compatibilizante e os grupos OH da celulose, proporcionando maior ancoragem ao polímero decorrente da menor ação hidrofílica da madeira. O pó de madeira ocasionou uma redução da resistência ao impacto, independente do teor utilizado, devido à menor mobilidade molecular obtida à medida que se aumenta o percentual das cargas nas formulações dos

compósitos. As amostras contendo pó de madeira apresentaram valores de resistência à tração superior ao valor do PEAD virgem.

6 CONCLUSÃO

O CPM é um ecocompósito multifásico artificial, composto de resíduos de madeira e termoplásticos pós-consumo, com propriedades conjuntas superiores às propriedades individuais de cada componente. É uma alternativa viável para a substituição da madeira natural e de polímeros virgens, apresentando as vantagens do plástico em si, permitindo o emprego desses produtos nas condições adversas do meio ambiente, e até mesmo para substituição do ferro fundido.

A madeira ecológica possui como limitação a impossibilidade de processamento em temperaturas superiores a 220°C devido à degradação térmica da carga lignocelulósica. E sua grande desvantagem é o alto valor de investimento inicial, mas levando-se em consideração os reparos necessários no produto natural, manutenção e durabilidade, a madeira sustentável ultrapassa o capital investido.

Fundamentado na revisão bibliográfica de trabalhos recentes, quanto maior a porcentagem de resíduos lignocelulósicos nos CPM, menor as propriedades físicas e mecânicas, que são melhoradas pela adição de um AC. Compósitos com até 30% de resíduos de madeira possibilitam a extrusão dos mesmos sem adição de compatibilizantes nas formulações, visto que o uso do polímero reciclado contém compatibilizantes em seu processamento primário sendo desnecessário uma nova incorporação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. B. **Madeira plástica: estudo de viabilidade técnico e econômico a partir do resíduo sólido**. 2013. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2013. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/103730/000936957.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 02 mai. 2018.
- ALMEIDA, G. S. G. de.; SOUZA, W. B. **Engenharia dos polímeros: tipos de aditivos, propriedades e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015. (Série Eixos).
- AMARAL, G. A. do.; SANTANA, R. M. C. **Estudo da influência da natureza das cargas nas propriedades da madeira plástica**. 2009. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, 2009. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/24743/000747660.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 16 abr. 2018.
- ANDRADE, J. J. de. O. Propriedades dos polímeros. In: ISAIA, G. C (Org./Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2, cap. 38, p. 1263-1291.
- ASHBY, M. F; JONES, D. R. H. **Engenharia de materiais**. 2. ed. trad. 3. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2007
- ASKELAND, D. R.; WRIGHT, W. J. **Ciência e engenharia dos materiais**. 2. ed. trad. 3. ed. norte-americana. São Paulo: Cengage Learning, 2016.
- BARBOSA, R. P; IBRAHIN, F. I. D. **Resíduos Sólidos: impactos, manejo e gestão ambiental**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2014. (Série Eixos).
- BATTISTELLE, R. et al. Caracterização física e mecânica de um compósito de polipropileno reciclado e farinha de madeira sem aditivos. **Revista Matéria**, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 7-15, jun. 2014. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/rmat/v19n1/1517-7076-rmat-19-01-00007.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2018.
- BREMER, C. F.; COLLI, G. Reciclagem de materiais para composição da madeira biosintética. **Revista Construindo**, Belo Horizonte, v. 5, n. 1, p. 52-60, jan./jun. 2013. Disponível em: <<http://www.fumec.br/revistas/construindo/article/view/1687/1066>>. Acesso em: 27 set. 2018.
- CABRAL, S. C. et al. Características comparativas da madeira plástica com a madeira convencional. **Revista Científica Vozes dos Vales**, UFVJM-MG, n. 10, p. 1-20, out. 2016. Disponível em:

<<http://site.ufvjm.edu.br/revistamultidisciplinar/files/2016/09/Stenio22.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

CALIL, Jr., C; LAHR, F. A. R; BRAZOLIN, S. Madeiras na construção civil. In: ISAIA, G. C (Org./Ed.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 2, cap. 34, p. 1149-1179.

CALLISTER, Jr., W. D. **Ciência e engenharia de materiais**: uma introdução. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

CANEVAROLO, Jr., S. V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. 2. ed. rev. ampl. São Paulo: Artliber Editora, 2002.

CATTO, A. L. **Resistência ao intemperismo natural e ataque fúngico de compósitos polímero-madeira**. 2015. 225 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/118838/000969186.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 16 abr. 2018.

CENSA INDUSTRIAL. **Processo de Extrusión**. Disponível em: <https://www.censaindustrial.com/blog_post.php?id=298>. Acesso em: 06 nov. 2018.

CERQUEIRA, P. H. A. de. et al. Análise dos resíduos madeireiros gerados pelas serrarias do Município de Eunápolis-BA. **Revista Floram - Floresta e Ambiente**, Vitória da Conquista-BA, v. 4, n. 19, p. 506-510, out./dez. 2012. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/floram/v19n4/v19n4a13.pdf>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

CLEMONS, C. Wood-plastic Composites in the United States: the interfacing of two industries. **Journal Forest Products**, Estados Unidos, v. 52, n. 6, p. 10-18, jun. 2002. Disponível em: <<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf2002/clemo02b.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

CEMPRE. **CICLOSOFT 2016**. Disponível em: <<http://cempre.org.br/ciclossoft/id/8>>. Acesso em: 24 abr. 2018.

CORTEZ, J. G.; CUNHA, C. J. da. **Processamento de Madeira Plástica**. 2013. 29 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia de Materiais)-Universidade do Vale do Paraíba-UniVap, Faculdade de Engenharia, Arquitetura e Urbanismo, São José dos Campos, 2013. Disponível em: <<http://biblioteca.univap.br/dados/000005/00000515.pdf>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

CORRÊA, G. R. **Desenvolvimento, produção e caracterização de compósitos de madeira-plásticos para aplicação na indústria moveleira**. 2004. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais)-Rede Temática em Engenharia de Materiais-UFOP-CETEC-UEMG, Belo Horizonte, 2004. Disponível em: <<http://www.redemat.ufop.br/arquivos/dissertacoes/2004/desenvolvimento%20producao.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

- CORREA, C. A. et al. Compósitos termoplásticos com madeira. **Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia**, Itatiba-SP, v. 13, n. 3, p. 154-165, 2003. Disponível em: <<http://revistapolimeros.org.br/files/v13n3/v13n3a03.pdf>>. Acesso em: 17 abr. 2018.
- COSTA, A. P. O. **Preparação e caracterização de compósitos de poliuretanas elastoméricas rígidas obtidas a partir de fontes renováveis**. 2007. 147 p. Tese (Doutorado em Ciências dos Materiais)-Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, Instituto de Química, Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Porto Alegre, 2007. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/12157/000623254.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 16 abr. 2018.
- DALFRÉ, G. M. **Cruzetas de polímeros reciclados: caracterização dos materiais, análise numérica e ensaios de modelos reduzidos**. 2007. 192 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Estruturas)-Universidade de São Paulo-USP, Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 2007. Disponível em: <<http://www.livrosgratis.com.br/ler-livro-online-19850/cruzetas-de-polimeros-reciclados--caracterizacao-dos-materiais-analise-numerica-e-ensaios-de-modelos-reduzidos>>. Acesso em: 30 abr. 2018.
- ENGLISH, B. et al. **Waste-Wood-Derived fillers for plastics**. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-91. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 15 p. 1996. Disponível em: <<https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fplgtr91.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2018.
- GAUTO, M. A.; ROSA, G. R. **Processos e operações unitárias da indústria química**. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna Ltda., 2011.
- GRISON, K. et al. Avaliação das propriedades mecânicas e morfológicas de compósitos de PEAD com pó de *Pinus taeda* e alumina calcinada. **Polímeros**, v. 25, n. 4, p. 408-413, fev. 2015. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v25n4/0104-1428-po-25-4-408.pdf>>. Acesso em: 24 set. 2018.
- GUAMÁ, F. F. M. C. de. et al. Lixo plástico: de sua produção até a madeira plástica. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 28, 2008. **A integração de cadeias produtivas com a abordagem da manufatura sustentável**. Rio de Janeiro: ABEPRO, 2008. Disponível em: <http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2008_TN_STO_077_542_11394.pdf>. Acesso em: 08 abr. 2018.
- GUIMARÃES, C. C. S. et al. Madeira Biosintética/Plástica/Sustentável. **Cadernos de Graduação: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Aracaju, v. 4, n. 3, p. 21-28, abr. 2018. Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/index.php/cadernoexatas/article/view/4827/2729>>. Acesso em: 24 set. 2018.
- GUIMARÃES, L. F. C. **Avaliação dos aspectos técnicos e econômicos na produção de madeira plástica por meio da utilização de materiais reciclados**. 2013. 125 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química)-Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, Belo Horizonte-MG, 2013. Disponível em:

<http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/BUOS-9KSJ28/disserta_o_de_mestrado_revf.pdf?sequence=1>. Acesso em: 02 mai. 2018.

HILLIG, É. **Viabilidade técnica de produção de compósitos de polietileno (HDPE) reforçados com resíduos de madeira e derivados das indústrias moveleiras**. 2006. 212 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná-UFPR, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba, 2006. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/7411/Tese.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 17 abr. 2018.

HILLIG, É.; SCHNEIDER, V. E.; PAVONI, E. T. Geração de resíduos de madeira e derivados da indústria moveleira em função das variáveis de produção. **Produção**, v. 19, n. 2, p. 292-303, 2009. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/prod/v19n2/v19n2a06.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

HOFFMANN, P.; JONES, M. A. Structure and degradation process for waterlogged archaeological wood. In: ROWELL, R. M.; BARBOUR, R. J. (Ed.). **Archaeological wood: properties, chemistry, and preservation**. Washington: ACS, 1989. p. 35–65.

IWAKIRI, S. et al. Utilização de resíduos de serraria na produção de chapas de madeira aglomerada de eucalyptus saligna, eucalyptus citriodora e eucalyptus pilularis. **Revista Floram – Floresta e Ambiente**, v. 7, n. 1, p. 251-256, jan./dez. 2000. Disponível em: <<http://www.floram.org/files/v7n%C3%BAnico/v7nunicoa26.pdf>>. Acesso em: 01 mai. 2018.

KRISHNASWAMY, P.; LAMPO, R. **Recycled-plastic lumber standards: from waste plastics to markets for plastic lumber bridges**. Standardization News, 2001. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.551.129&rep=rep1&type=pdf>>. Acesso em: 02 mai. 2018.

LAMPO, R.; NOSKER, T.; SULLIVAN, H. **Development, testing, and applications of recycled plastic composite cross ties**. In: WORLD CONGRESS ON RAILWAY. 2003. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Thomas_Nosker/publication/265011359_Development_Testing_and_Applications_of_Recycled_Plastic_Composite_Cross_Ties/link/s/5446768d0cf2d62c304dc066.pdf>. Acesso em: 02 mai. 2018.

LU, J. Z.; WU, Q.; MCNABB, Jr, H. S. Chemical coupling in wood fiber and polymer composites: a review of coupling agents and treatments. **Wood and Fiber Science**, v. 32, n. 1, p. 88-104, jan. 2000. Disponível em: <<https://wfs.swst.org/index.php/wfs/article/view/1311/1311>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

MACIEL, A. da. S. **Chapas de partículas aglomeradas de madeira de Pinus Elliottii ou Eucalyptus Grandis, em mistura com poliestireno e polietileno tereftalato**. 2001. 131 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa-UFV, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Viçosa,

2001. Disponível em:

<<http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/11280/texto%20completo.PDF?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

MACIEL, A. da. S. et al. Painéis de partículas aglomeradas de madeira de pinus *elliottii* engelm., poliestireno (PS) e polietileno tereftalato (PET). **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 28, n. 2, p. 257-266, 2004. Disponível em:

<<http://www.scielo.br/pdf/rarv/v28n2/20990.pdf>>. Acesso em: 30 abr. 2018.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução a polímeros**. 2. ed. rev. e ampl. São Paulo: Edgard Blucher, 2004.

MANO, E. B. **Polímeros como materiais de engenharia**. São Paulo: Blucher, 1991.

MANRICH, S. **Processamento de Termoplásticos**: rosca única, extrusão e matrizes, injeção e moldes. São Paulo: Artliber Editora, 2005.

MILAGRES, E. G. **Compósitos de partículas de madeira de Eucalyptus Grandis, polipropileno e polietileno de alta e baixa densidade**. 2004. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal)-Universidade Federal de Viçosa-UFV, Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, Viçosa, 2004. Disponível em:

<<http://www.locus.ufv.br/bitstream/handle/123456789/9317/texto%20completo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 14 abr. 2018.

MOLINA, J. C.; CARREIRA, M. R.; CALIL, Jr., C. Análise do comportamento mecânico de perfis retangulares de madeira plástica (Wood Plastic Composite).

Pesquisa e Tecnologia MINERVA, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 47-57, jan./abr. 2009.

Disponível em: <[http://www.fipai.org.br/Minerva%2006\(01\)%2006.pdf](http://www.fipai.org.br/Minerva%2006(01)%2006.pdf)>. Acesso em: 17 abr. 2018.

NANI, E. L. **Meio ambiente e reciclagem**: um caminho a ser seguido. 1. ed. (2007), 4ª reimpr. Curitiba : Juruá, 2011. 58 p.

NAZÁRIO, G. F. et al. Madeira plástica: uma revisão conceitual. **Revista**

Engenharia em Ação UniToledo, Araçatuba-SP, v. 01, p. 54-71, out./dez. 2016.

Disponível em: <<http://ojs.toledo.br/index.php/engenharias/article/view/71/34>>.

Acesso em: 22 mar. 2018.

NOVO, L. P. **Novas perspectivas para uma biorrefinaria de cana-de-açúcar no Brasil**. 2016. Tese (Doutorado em Físico-Química) – Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo-USP, São Carlos, 2016. Disponível em:

<<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/75/75134/tde-12082016-090114/pt-br.php>>. Acesso em: 12 mai. 2018.

OHARA, W. S. **Estudo das propriedades mecânicas da madeira plástica**. 2011.

57 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica)-Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista-Unesp, Guaratinguetá, 2011. Disponível em:

<http://200.145.6.238/bitstream/handle/11449/120223/ohara_ws_tcc_guara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 25 abr. 2018.

OLIVEIRA, J. H. I. de. **Desenvolvimento do processo de fabricação de laminados de material composto polimérico de fibra de vidro para aplicação na construção aeronáutica**. 2007. 130 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal de Minas Gerais-UFMG, Programa De Pós-Graduação Em Engenharia Mecânica, Belo Horizonte, 2007. Disponível em: <http://www.bibliotecadigital.ufmg.br/dspace/bitstream/handle/1843/SBPS-7B5M9G/tese_final_corrigida_1_.pdf?sequence=1>. Acesso em: 02 mai. 2018.

PARKER, L. Planeta ou plástico? **Revista National Geographic**. Jun. 2018. Disponível em: <<https://www.nationalgeographic.com/magazine/2018/06/plastic-planet-waste-pollution-trash-crisis/>>. Acesso em: 12 jun. 2018.

PFEIL, W.; PFEIL, M. **Estruturas de madeira**. 6. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC, 2012.

PLÁSTICO VIRTUAL. **Aplicações do plástico: você sabe o que pode ser feito com o ABS?** 2016. Disponível em: <<https://plasticovirtual.com.br/aplicacoes-do-plastico-voce-sabe-o-que-pode-ser-feito-com-o-abs/>>. Acesso em: 24 out. 2018.

RABELLO, M. S. **Aditivação de Polímeros**. São Paulo: Artliber Editora, 2000.

RODOLFO, Jr, A.; JOHN, V. M. Desenvolvimento de PVC reforçado com resíduos de pinus para substituir madeira convencional em diversas aplicações. **Revista Polímeros: Ciência e Tecnologia**, São Paulo, v. 16, n. 1, p. 1-11, 2006. Disponível em: <<http://www.scielo.br/pdf/po/v16n1/v16n1a05.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2018.

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. **Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda., 2012.

SPINACÉ, M. A. da S.; PAOLI, M. A. de. A tecnologia da reciclagem de polímeros. **Química Nova**, Campinas-SP, v. 28, n. 1, p. 65-72, 2005. Disponível em: <http://quimicanova.sbq.org.br/imagebank/pdf/Vol28No1_65_13-RV03270.pdf>. Acesso em: 17 abr. 2018.

STRAPASSON, R. **Valorização do polipropileno através de sua mistura e reciclagem**. 2004. 94 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica)- Universidade Federal do Paraná-UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Setor de Tecnologia, Curitiba, 2004. Disponível em: <http://www.pgmecc.ufpr.br/dissertacoes/dissertacao_020.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2018.

TEIXEIRA, D. E.; MOREIRA, J. M. M. A. P.; COSTA, A. F. de. Confecção de composto de madeira-plástico utilizando resíduos de eucalyptus grandis HILL EX-Maiden e polietileno de baixa densidade (PEBD). **Revista Floram – Floresta e Ambiente**, Rio de Janeiro, v. 9, n. 1, p. 72-80, jan./dez. 2002.

TEIXEIRA, M. G. **Aplicação de conceitos da ecologia industrial para a produção de materiais ecológicos: o exemplo do resíduo de madeira**. 2005. 159 p. Dissertação (Mestrado em Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no Processo Produtivo)- Universidade Federal da Bahia, Escola Politécnica-UFBA, Salvador, 2005. Disponível em:

<http://teclim.ufba.br/site/material_online/dissertacoes/dis_marcelo_g_teixeira.pdf>. Acesso em: 11 abr. 2018.

TEIXEIRA, M. G.; CÉSAR, S. F. Produção de compósito com resíduo de madeira no contexto da ecologia industrial. In: ENCONTRO BRASILEIRO EM MADEIRAS E EM ESTRUTURAS DE MADEIRA, v. 7, n. 19, 2006, São Pedro SP. **Anais do 10° Encontro Brasileiro em Madeiras e em Estruturas de Madeira**. São Paulo: CEVEMAD/UNESP – EBRAMEM, 2006. Disponível em: <http://portal.faculdadedacidade.edu.br/index2.php?option=com_docman&task=doc_view&gid=7&Itemid=290>. Acesso em: 22. mar. 2018.

TOLENTINO, N. M. de. C. **Processos químicos industriais**: matérias-primas, técnicas de produção e métodos de controle de corrosão. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015. (Série Eixos).

YAMAJI, F. M.; BONDUELLE, A. Utilização da serragem na produção de compósitos plástico-madeira. **Revista Floresta**, Curitiba-PR, v. 34, n. 1, p. 59-66, jan. 2004. Disponível em: <<http://revistas.ufpr.br/floresta/article/viewFile/2375/1984>>. Acesso em: 11 abr. 2018.

YAMAJI, F. M. **Produção de compósito plástico-madeira a partir de resíduos da indústria madeireira**. 2004. 182 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais)-Universidade Federal do Paraná-UFPR, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Setor de Ciências Agrárias, Curitiba-PR, 2004. Disponível em: <<https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/819/Yamaji%2c%20F%3fbio.pdf?sequence=1&isAllowed=y>>. Acesso em: 04 mai. 2018.

ZOCH, V. P. **Produção e propriedades de compósitos madeira-plástico utilizando resíduos minimamente processados**. 2013. 52 p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal)-Universidade de Brasília-UnB, Brasília, 2013. Disponível em: <http://bdm.unb.br/bitstream/10483/4840/1/2013_VanessaPozziZoch.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2018.